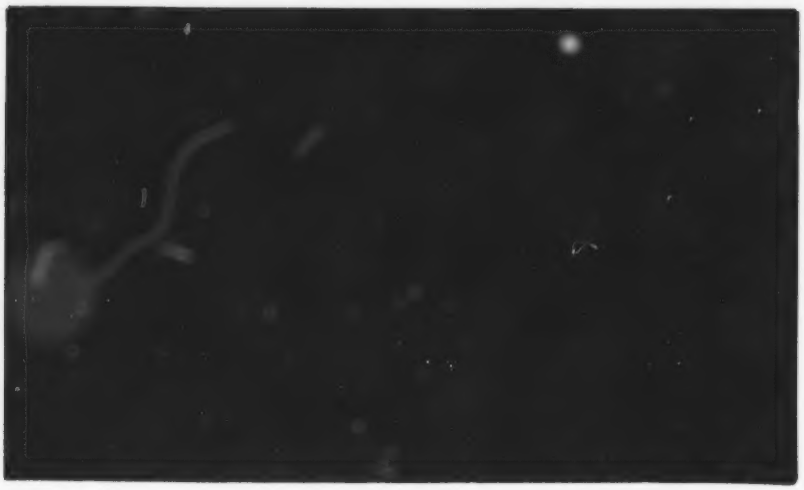
CENTRE
DE RECHERCHE
SUR LES TRANSPORTS
(CRT)
CENTRE
FOR RESEARCH
ON TRANSPORTATION

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE DES HAUTES ÉTUDES COMMERCIALES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE



C.P. 6128, SUCCURSALE A
MONTRÉAL (QUÉBEC)
CANADA
H3C 3J7

TÉLÉPHONE : (514) 343-7575
TÉLEX : 05-24146 BIBPOLYTEC
TÉLÉCOPIEUR (FAX) : (514) 343-7121

Présenté au:

"Colloque sur le Développement des Sciences
et Pratiques de l'Organisation"

et aux

"4es journées francophones sur la Logistique et les Transports"

Paris, 13-14-15 décembre 1989

CRT-656

TRANSPORT TERRESTRE MULTIMODAL DE CONTENEURS : PROBLÉMATIQUE ET MODÈLES

par

Teodor Gabriel Crainic[1,2]
Pierre Dejax[3]
Michel Gendreau[1]

1 Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, C.P. 6128, Succursale "A", Montréal, Québec, Canada, H3V 3JC.

2 Département des Sciences administratives, Université du Québec à Montréal, C.P. 6192, Succursale "A", Montréal, Québec, Canada, H3C 4R2.

3 Laboratoire Économique, Industriel et Social, École Centrale de Paris 92295 Chatenay-Malabry Cedex, France.

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un projet de coopération France-Québec no 20020686 FQ, et a bénéficié de subventions du Fonds F.C.A.R.-Action concertée (transport des marchandises) et du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada.

Centre de recherche sur les transports - Publication #656

École Centrale de Paris
Laboratoire Économique, Industriel et Social - Cahier #89-08

Novembre 1989

90-01430/

Dépôt légal - 4e trimestre 1989

RESUME

Nous examinons la problématique et les principales composantes de la planification des opérations de transport terrestre de conteneurs: localisation des dépôts, prévision des flux de conteneurs vides requis pour rééquilibrer le réseau, détermination des itinéraires et modes de transport des conteneurs vides et pleins, gestion de la flotte et répartition, estimation des coûts et demandes, etc. Nous nous concentrons sur les aspects de modélisation des problèmes et nous présentons une approche de modélisation intégrée comprenant un modèle stratégique/tactique de localisation/distribution et un modèle stochastique et dynamique de répartition et acheminement.

MOTS CLES: Gestion de flotte,
Transport terrestre de conteneurs,
Localisation de terminaux,
Allocation dynamique et stochastique des véhicules.

ABSTRACT

We examine and discuss the main issues related to the management and planning of the land transportation of containers: location of inland terminals, planning of empty container flows to balance the network, construction of routes and choice of transportation modes for loaded and empty movements, fleet management and dynamic allocation of vehicles, cost and demand estimation. We focus on the modeling aspects of these problems and present an integrated modeling approach, that contains a strategic/tactical location/distribution formulation and a stochastic dynamic vehicle allocation and routing model.

KEY WORDS: Fleet Management,
Land Container Transportation,
Location of Terminals,
Dynamic, Stochastic Vehicle Allocation.

La planification du transport terrestre des conteneurs pour le commerce maritime international est une activité rendue extrêmement complexe par le contexte de la recherche permanente de l'efficacité économique des opérations et de la compétitivité et de la performance en termes de qualité du service rendu à la clientèle.

Dans ce contexte, les modèles et méthodes de recherche opérationnelle peuvent fournir une aide précieuse, et parfois déterminante, dans cette recherche d'efficacité et de satisfaction des besoins et attentes de la clientèle, en permettant de rendre plus efficaces les moyens et méthodes d'évaluation, d'analyse et de planification des opérations et de l'évolution de la compagnie. Ces modèles et méthodes sont d'autant plus efficaces qu'ils se présentent sous la forme de logiciels d'aide à la prise de décision et à la planification conviviaux, offrant des interfaces interactives-graphiques, et qu'ils s'appuient sur un système d'information reliant toutes les instances décisionnelles et opératives du système: planification centrale, services commerciaux, planification des transports maritimes et gestion et opération de la flotte marchande, gestion de la flotte de conteneurs, opération des dépôts, etc. (Crainic et Dejax, 1989).

Il est surprenant toutefois de s'apercevoir, lors, par exemple, d'une étude de la littérature spécialisée (voir, par exemple, Dejax et Crainic, 1987), combien peu nombreux sont les modèles développés spécialement pour le transport des conteneurs, qui, par ailleurs, s'adressent presque exclusivement aux problèmes reliés à la partie maritime du voyage. Cet état de fait peut s'expliquer, au moins partiellement, par l'effet combiné de la complexité des problèmes associés à l'analyse et à la planification du transport terrestre de conteneurs et de l'opinion, prévalant jusqu'à tout récemment dans l'industrie, que cet aspect des opérations de la compagnie n'a qu'un impact somme toute assez négligeable sur les performances globales de l'entreprise. C'est surtout cette dernière perception qui, graduellement, évolue actuellement vers la reconnaissance de l'importance de la partie terrestre des opérations sur les performances économiques et de service du système de transport de conteneurs.

Nous avons entrepris notre programme de recherche dans ce domaine dans le but de répondre à ces besoins, en mettant au point un ensemble de modèles, algorithmes et outils qui assistent et améliorent l'évaluation, l'analyse et la planification du transport terrestre de

conteneurs. Le but de cet article est de faire une mise au point sur ce programme, d'en souligner les principales réalisations et de proposer des avenues intéressantes de recherche dans le domaine du transport terrestre de conteneurs. L'article suit le plan suivant. Nous débutons par une description de la problèmatique générale, suivie de la présentation de notre approche de modélisation et résolution. Nous poursuivons par une brève présentation des résultats de nos recherches concernant deux aspects du problème qui, quoique ne présentant pas le panache et l'intérêt de, par exemple, la mise au point d'un nouvel algorithme de programmation mathématique, n'en ont pas moins une importance primordiale pour la bonne marche du programme: l'évaluation des coûts et l'analyse de la demande. Nous concluons par une exposition des avenues de recherche qui, à notre avis, présentent un intérêt pour le domaine étudié.

I. Problématique

Le type de compagnie de transport par conteneurs auquel nous nous intéressons, opère un réseau maritime international et assure le transport terrestre des conteneurs entre les ports et un ensemble de clients répandus sur un territoire géographiquement de grande taille, voire continentale. Ainsi, par exemple, la zone géographique prise en compte dans notre application couvre la France, la R.F.A et le Bénélux, ce qui correspond à environ 80% des mouvements effectués par la compagnie (Dejax, Crainic et Delorme, 1988).

Les mouvements de conteneurs sont de deux types: les mouvements commerciaux (importations, exportations) des conteneurs chargés, directement générateurs de profits, et les mouvements techniques (rééquilibrage de vides entre dépôts, mouvements de conteneurs loués ou avariés, etc.). Une séquence type de mouvements à l'importation est la suivante: les conteneurs arrivent chargés au port, d'où ils sont transportés par voie terrestre jusqu'au client; après avoir été déchargés, les conteneurs vides sont alors renvoyés vers un des dépôts de la compagnie. La séquence ''symétrique'' à l'exportation débute avec une commande de conteneurs vides d'un client à la compagnie. Les conteneurs vides sont livrés à partir d'un des dépôts de l'entreprise et, une fois chargés, ils sont transportés par voie terrestre jusqu'au port où ils sont embarqués sur le navire en partance vers leur destination finale.

On remarque l'importance des mouvements de conteneurs vides. Premièrement, tout mouvement commercial génère presque automatiquement un mouvement technique à vide. En effet, à l'importation, un conteneur plein livré à un client est, une fois déchargé, normalement transporté à vide jusqu'au dépôt désigné. Similairement, à l'exportation, un conteneur vide doit d'abord être livré au client demandeur avant que le mouvement commercial puisse être effectué (et facturé).

Une deuxième source importante de mouvements à vide est constituée par les différences que l'on peut observer à l'intérieur d'une zone donnée, entre les demandes pour des conteneurs vides d'un type donné et le nombre de conteneurs, de même type, envoyés dans la même région et qui, une fois déchargés, pourront satisfaire cette demande. L'intensité de ce déséquilibre entre l'offre et la demande de conteneurs vides varie selon la zone et le type de conteneurs et nécessite des mouvements entre les zones (et,

éventuellement, également des mouvements maritimes de conteneurs vides) afin de rééquilibrer le réseau.

Les mouvements à vide occupent une place déterminante dans les opérations de transport terrestre de conteneurs, tant par l'impact considérable qu'il peuvent avoir sur la qualité de service, que par les ressources qu'ils mobilisent. A cet égard, il peut être utile de rappeler que, dans la pratique courante, ce type de mouvements peut représenter jusqu'à 40% des coûts d'opération. Or, si les mouvements à vide sont largement inévitables, il est possible d'en contrôler l'intensité par une planification logistique judicieuse et intégrée des opérations, au niveau de tout le réseau. C'est un des buts principaux des modèles que nous développons.

Quelques autres caractéristiques d'un système de transport terrestre de conteneurs qui ont une influence majeure sur sa planification et, donc, sa modélisation sont les suivantes:

- Il y a un nombre important de types différents de conteneurs; on doit en considérer environ une vingtaine pour s'assurer d'une analyse réaliste, se distinguant par la taille (e.g. 20 pieds, 40 pieds, ...), la fonctionnalité (usage général, isotherme, frigorifique, etc. ...), l'affectation à des lignes particulières (e.g., les Antilles Françaises), etc.
- Il y a plusieurs modes de transport terrestre se distinguant par: le type d'infrastructure utilisée (rail, route, canaux/rivières, etc.) et, dans le cas du rail, si le client dispose d'un embranchement ferroviaire qui lui soit propre ou s'il faut utiliser une combinaison rail-route; le caractère national ou international du voyage; le régime de transport indiquant à qui incombe la responsabilité du transport terrestre. Les principales règles sont: 1. la compagnie paye la totalité du transport (environ 70% des mouvements pour notre application); 2. le client organise le transport à ses frais (20% des mouvements). Il faut noter que, pour le problème décrit dans cet article, transport "terrestre" doit être pris dans un sens très large, signifiant en fait tout transport non maritime de long cours.
- Dans le cas du camionnage, le mode est aussi déterminé par le type de contrat liant la compagnie et le camionneur (dans notre application, la compagnie ne possède aucun camion en propre): aller seulement, aller et retour entre client et dépôt, parcours "triangulaire" de client à client, etc.

- Traditionnellement, les ports servent aussi de dépôts et, au moins dans notre application, relativement peu de dépôts sont situés à l'intérieur des terres. Ceci occasionne donc un mouvement important, en termes de conteneurs-km, de conteneurs vides, qu'il est possible de diminuer en utilisant des dépôts à l'intérieur.
- Il est possible d'utiliser de tels dépôts tout en encourant des coûts fixes de localisation et opération minimes, en se basant sur des installations déjà existentes, par exemple, les gares de triage des compagnies de chemin de fer. Les relativement bas coûts fixes des dépôts inhérents à ce système rendent possible une réévaluation périodique du nombre et du choix spécifique des dépôts à utiliser, ce qui permet d'ajuster plus finement le comportement du système à l'évolution des marchés ou de l'environnement économique, concurrentiel ou réglementaire.
- Il est supposé que des tarifs spéciaux, réduits, peuvent être négociés, par exemple avec les compagnies de chemin de fer, pour l'expédition groupée d'un nombre important de conteneurs (un ou plusiers trains complets, par exemple) sur des longues distances (e.g. mouvements inter-dépôts).

Parmi les problèmes de planification les plus importantes qu'on se doit d'analyser et de résoudre dans un tel contexte, mentionnons:

- Où localiser les dépôts à utiliser lors de la prochaine période de planification?
- Pour chaque client et pour chaque type de conteneurs, décider les dépôts avec lesquels le client doit faire affaire lorsqu'il demande des conteneurs vides pour l'exportation ou doit y expédier les conteneurs une fois déchargés, après une importation.
- Prévoir et optimiser les flux inter-régionaux de conteneurs vides afin de compenser les différences entre l'offre et la demande de conteneurs et ainsi rééquilibrer le réseau.
- Assurer la gestion et la répartition de la flotte de conteneurs, vides et pleins, afin de satisfaire la demande connue et prévue et de réaliser les mouvements inter-dépôts de conteneurs vides requis.
- Déterminer l'itinéraire, les modes et la tarification de transport des conteneurs pleins et vides.

Nous présentons dans la prochaine section l'approche de modélisation et de résolution que nous proposons pour répondre à ces questions.

II. Approche de modélisation

Lorsque nous avons débuté notre programme de recherche concernant le transport terrestre de conteneurs, nous avons d'abord reconnu (i) que tous les problèmes ne se situent pas au même niveau dans le processus de planification et de gestion des opérations de la compagnie, et qu'ils n'impliquent pas le même personnel ni ne requièrent pas les mêmes ressources pour leur planification ou exécution; (ii) que tous les problèmes ne font pas appel aux mêmes données; (iii) qu'il y a une hiérarchie dans la séquence de décisions et, donc, dans le flux d'informations correspondant; (iv) donc, qu'il n'est pas souhaitable de construire un seul modèle qui tente de résoudre tous les problèmes en même temps.

Nous proposons donc une approche de résolution à deux niveaux, dont le traitement du problème global est parallèle à, et reflète, la structure hiérarchique des décisions et échanges d'informations observée.

Le premier niveau concerne la planification **stratégique/tactique** des opérations de la compagnie, et est axé vers le choix des dépôts, l'affectation des clients aux dépôts et la détermination des grands flux inter-dépôts de conteneurs vides, sur un horizon de planification moyen (six mois ou une année), à partir de prévisions globales et de données agrégées. C'est à ce niveau qu'on établit le *plan tactique* des opérations et qu'on évalue les conséquences, en termes de performances du système et d'utilisation du réseau, de divers scénarios stratégiques concernant l'évolution de la compagnie.

Le second niveau correspond au niveau de la planification **opérationnelle** des activités, où, dans un environnement dynamique, il s'agit de répondre à la demande et de choisir les moyens d'acheminement des conteneurs, tout en se conformant au plan tactique. On identifie souvent ces activités sous le nom de *répartition*.

Le modèle stratégique/tactique se formule comme un problème de localisation/distribution multimode multiproduit avec des échanges entre les dépôts (Crainic, Dejax et Delorme, 1989). Nous avons étudié diverses variantes (correspondant à diverses politiques concernant le rattachement des clients aux dépôts) de cette formulation qui, tout en présentant certaines similitudes avec les problèmes classiques de localisation, possède des caractéristiques particulières. La plus importante parmi celles-ci, est une

structure sous-jacente de réseau, qui favorise le développement d'algorithmes spécifiques plutôt que le recours à des méthodes générales de résolution pour des problèmes de localisation avec contraintes additionnelles.

Parmi les algorithmes développés spécialement pour cette formulation, mentionnons une méthode d'énumération (''branch-and-bound'' - Crainic, Delorme et Dejax, 1989; Hodgson, 1989) et une approche duale (Delorme, Crainic et Dejax, 1988) qui, lorsque combinées, permettent une résolution très efficace du problème (Crainic, Delorme et Dejax, 1988; Delorme, Crainic et Dejax, 1989). Nous poursuivons également la mise au point d'algorithmes basés sur la relaxation Lagrangienne (Guo et col., 1989), ainsi que sur des approches qui combinent des méthodes de restriction et primale/duale (Tétreault 1989; Tétreault, Delorme et Crainic, 1989), permettant de tirer pleinement parti de la structure de réseau du problème.

L'efficacité des méthodes de résolution nous assure que le problème stratégique/tactique pourra être résolu aussi souvent que les variations dans la demande ou le contexte économique ou réglementaire le demandera. Le plan tactique résultant de cette étape spécifie les dépôts à utiliser pour la prochaine période, le dépôt avec lequel chaque client devra traiter pour chaque type de conteneur et pour chaque type de transaction (demande ou retour de conteneur vide), ainsi que les flux de conteneurs vides, de chaque type, entre les dépôts, requis pour équilibrer l'offre et la demande de conteneurs vides pour la durée de la période de planification.

Ce plan tactique constitue un moyen privilégié d'évaluation de scénarios stratégiques de développement de la compagnie, et fournit le cadre à l'intérieur duquel les activités de répartition doivent évoluer.

L'approche que nous proposons pour le modèle de répartition consiste en un modèle d'optimisation de réseau stochastique et dynamique. D'autres approches de modélisation (modèles de Markov, programmation stochastique, etc. - voir Powell, 1988; ou Gendreau, 1988; pour plus de détails) peuvent être envisagées, mais nous privilégions celle-ci à cause des algorithmes efficaces qui peuvent être mis au point pour des formulations basées sur des réseaux.

La partie dynamique de la formulation reflète les effets des décisions courantes sur les mouvements des conteneurs à la fois dans la période actuelle et dans les périodes subséquentes. Ces effets sont représentés par l'intermédiaire d'un réseau espace/temps, dont les noeuds représentent les localisation des dépôts et des clients à chacune des périodes considérées, tandis que les liens modèlisent les mouvements possibles de conteneurs à la fois dans l'espace et dans le temps. Le réseau est défini sur un horizon fuyant, dont la durée dépend de la durée maximale d'un déplacement et de celle de l'horizon de planification opérationnelle, normalement une semaine.

Les élements stochastiques du modèle veulent modéliser les incertitudes inhérentes à l'opération en temps réel d'un système de transport. Les principales sources de stochasticité que nous voulons représenter sont: la partie incertaine de la demande (l'incertitude peut s'accroître avec l'éloignement dans le temps par rapport à la période courante), les variations des durées passées par les conteneurs chez les clients pour être chargés ou déchargés, les fluctuations des temps de transport par certains modes ou sur certains itinéraires.

La recherche des meilleurs acheminements (choix de mode, itinéraires, tarifs, etc.) se fera, dans un premier temps, séparément du modèle opérationnel. En effet, une fois déterminés les mouvements de conteneurs pleins et vides à effectuer, nous utilisons des procédures de détermination de routes et tournées pour établir une liste d'acheminements qui minimisent les coûts totaux de transport, tout en tenant compte des délais et objectifs de service à respecter. Cette procédure pourra être appellée aussi souvent que nécessaire pour évaluer finement les activités de transport qui correspondent à un certain ensemble de décisions de répartition. A moyen terme, cependant, nous prévoyons d'intégrer cette recherche des acheminements optimaux dans le modèle opérationnel, afin d'assurer une meilleure prise en compte des coûts et contraintes de transport dans la décision de répartition.

Il est important de noter que ces modèles opérationnels doivent, afin de pouvoir jouer pleinement leur rôle, être intégrés dans un système interactif-graphique d'aide à la prise de décision, fonctionnant en temps réel (ou pseudo-réel) et qui est branché sur le système d'information de l'entreprise.

III. Réseaux, coûts, demandes

La mise au point, l'expérimentation et la validation des modèles et algorithmes précédents requièrent la connaissance de multiples informations concernant le système étudié, notamment le réseau, les coûts et la demande. Nous examinons brièvement dans cette section quelques aspects importants reliés à la modélisation et l'estimation de ces éléments.

Le réseau de base pour l'ensemble de nos recherches représente le réseau des opérations terrestres de l'entreprise: les dépôts, les clients et les liens entre ces localisations. Nous avons identifié ce réseau à partir de l'ensemble des mouvements effectués par l'entreprise pendant toute une année (nous appelons celle-ci *année de base).*

En accord avec les représentants de la compagnie, nous avons estimé que la zone géographique de l'étude stratégique/tactique pouvait être subdivisée en environ 300 zones-clients. En effectuant le découpage de manière à obtenir des zones les plus cohérentes possibles, tant sur le plan du trafic de conteneurs que sur celui de la taille géographique, nous avons obtenu 288 zones-clients. Quant aux dépôts, nous avons retenu tous les ports et tous les dépôts identifiés par la compagnie (même ceux qu'elle n'utilisait pas dans l'année de base); cela fit 129 dépôts. Uniquement les dépôts utilisés pendant une période donnée feront, évidement, partie du réseau du modèle opérationnel de répartition.

Toutes les liaisons effectuées par l'entreprise dans l'année de base ont été retenues. Il faut remarquer que, même après avoir ajusté ce réseau afin de donner plus de latitude aux modèles d'optimisation, le nombre de liens n'est que d'environ 10 000, ce qui est très loin du 3 469 440 arcs d'un graphe complet (pour 20 types de conteneurs mais un seul mode de transport) correspondant à ce problème. Il est évident devant cette taille potentielle de réseau que, même si plus de liaisons que celles effectivement effectuées à une année donnée doivent être utilisées afin de profiter pleinement de la puissance des méthodes d'optimisation (surtout dans une phase d'exploration de scénarios), des décisions "logistiques" doivent être prises a priori, afin d'éviter l'inclusion d'un grand nombre de liens inutiles.

Dès le début de l'étude, nous disposions des coûts effectivement observés sur les liaisons effectuées dans l'année de base. Ces informations nous ont été fort précieuses, nous permettant de valider le modèle et de démontrer l'intérêt de la méthode et les améliorations qu'on peut atteindre en l'utilisant.

Ces informations ne sont toutefois plus suffisantes, dès qu'on envisage d'utiliser l'approche que nous proposons pour prévoir et planifier. En effet, il faut alors connaître les coûts pour tous les modes de transport à notre disposition, sur toutes les liaisons possibles.

Nous avons donc entrepris (Vasseur, 1988) une étude préliminaire visant à déterminer si, à partir des informations concernant les coûts sur les arcs connus, nous pouvons déduire, à l'aide de logiciels de régression statistique, une (ou des) formule(s) générale(s) pour les coûts. L'étude est préliminaire, car son objet a été limité aux liens de chemin de fer pour lequel nous avons pu bénéficier d'un distancier fer de la SNCF couvrant le territoire français. Nous croyons, toutefois, que la méthodologie ainsi développée pourra être généralisée aussi aux autres cas. Il est aussi important de préciser que nous ne cherchons pas des "vraies" formules de coût, à utiliser dans un environnement comptable ou de facturation, mais bien une façon systématique d'attribuer des valeurs aux liens qui reflètent aussi fidèlement que possible ces coûts dans un objectif de planification.

A partir de l'observation des données de la compagnie, nous avons choisi comme variables explicatives possibles le *poids* des conteneurs transportés, leur *nombre*, le *nombre de clients desservis* et la *distance*. Les facteurs qui déterminent la population pour laquelle une fonction est cherchée sont: la *taille et type de conteneur*, la *région d'arrivée* et la *région de départ*, le *mode* (rail ou combinaison rail-route) et la *responsabilité* du transport et, enfin, le *degré de chargement* (plein, vide) du conteneur. Suite à l'expérimentation, nous avons remarqué que la spécification des zones d'arrivée et de départ n'est pas nécessaire pour définir les fonctions. Cela est dû à l'homogénéité implicite des tarifs de la SNCF sur le territoire. Il sera intéressant de voir si le même résultat est aussi obtenu pour le camionnage. Le logiciel **BMDP** (Dixon, 1983) a été utilisé pour effectuer les analyses de régression.

Plusieures formes linéaires ont dû être écartées, soit à cause d'un trop faible coefficient d'ajustement, soit à cause du caractère non aléatoire des résidus obtenus. Ainsi

$$deb = \mathbf{a} + \mathbf{b}\ poids + \mathbf{c}\ nom + \mathbf{d}\ distance$$

$$deb/nom = \mathbf{a} + \mathbf{b}\ poids + \mathbf{c}\ nom + \mathbf{d}\ distance$$

$$deb/nom = \mathbf{a} + \mathbf{b}\ poids/nom + \mathbf{c}\ nom + \mathbf{d}\ distance$$

$$deb/(poids\ \ distance) = \mathbf{a} + \mathbf{b}\ poids + \mathbf{c}\ nom + \mathbf{d}\ distance + \mathbf{e}\ nom/poids + \mathbf{f}\ nom/distance$$

(où *deb* représente le coût à associer au déplacement et *nom* indique le nombre de conteneurs) sont des exemples de formes fonctionnelles rejetées. Les mêmes conclusions ont également été retenues lorsque, dans les formes linéaires, certaines variables ''importantes'' (telles la distance et le coût) ont été transformées: logarithmes, exponentiation, racines.

Finalement, la forme fonctionnelle qui donne les meilleurs résultats (en termes de précision et d'ajustement) pour les types de transport ferroviaire étudiés est:

$$deb = exp(\mathbf{a})\ (poids/nombre)^{\mathbf{b}} + (nombre)^{\mathbf{c}} + (distance)^{\mathbf{d}}$$

ce qui est également ''intuitivement'' satisfaisant, puisqu'on s'attend à ce que les effets des variables explicatives se combinent plutôt que de se juxtaposer tout simplement. Nous poursuivons actuellement cette étude pour les autres types de transport ferroviaire et pour les autres modes de transport, surtout les divers types de camionnage.

L'estimation des offres et demandes de conteneurs constitue un des aspects déterminants du processus de planification. Ainsi, il est évident que les modèles et systèmes d'aide à la décision se baseront sur les prévisions, à court et moyen termes, établies par l'entreprise, que ce soit par les départements commerciaux (marketing, ventes, etc.) ou ailleurs. Dans le cas de nos travaux, ces informations n'étaient cependant pas disponibles. Nous avons donc dû les estimer, à partir des observations de l'année de base, en utilisant les mouvements de conteneurs pleins pour en déduire les disponibilités et demandes de conteneurs vides (Dejax et col., 1987).

Cependant, pour faciliter la mise au point des modèles, et des algorithmes correspondants, dynamiques et stochastiques pour la planification opérationnelle et les activités de répartition, nous avons dû entreprendre l'examen des variations de la demande à court

terme, dans notre cas sur un horizon journalier. Le but de cette étude est de déterminer une (ou des) formule(s) pour la demande moyenne de conteneurs et la distribution qui régit les variations de cette demande.

Nous avons complété (Steffan, 1989) la première étape de cette étude, destinée surtout à préciser l'ensemble des outils statistiques requis et à obtenir un premier tableau, à raffiner au cours d'analyses ultérieures, des lois régissant la stochasticité de la demande. Remarquons aussi que les données dont nous disposions n'étaient malheureusement pas bien adaptées à ce genre d'études: pas assez nombreuses lorsque divisées par zone/période/type de conteneur et pas assez fiables quant aux dates d'enregistrement.

Nous avions l'idée, a priori, d'une fonction de demande de la forme

$$D_{js}^{p} = D_{j}^{s} \ \theta_{j}^{p}$$

où

D_{js}^{p} : Demande pour le produit p, le jour j, la semaine s

D_{j}^{p} : Demande pour le produit p, la semaine s

θ_{j}^{p} : Facteur multiplicatif de jour pour le produit p

Les résultats de plusieurs analyses de régression nous ont convaincu, toutefois, que les jours de la semaine ne sont pas statistiquement significatifs, sauf par rapport aux jours de week-end, bien entendu. Nous avons donc étudié d'abord la demande hebdomadaire par type de conteneur, et ensuite la demande par couple (produit, zone).

Les résultats obtenus sont extrêmement encourageants, compte tenu de la qualité et du volume des données disponibles. Pour tous les cas où les demandes sont fortes (par exemple, au moins 300 conteneurs par produit-zone par année), nous avons réussi soit à identifier une distribution *(Normale* ou *Poisson*, selon le cas), soit à déterminer un modèle de demande basé sur une série chronologique (Box et Jenkins, 1976). Nous avons aussi observé que ces modèles sont différents entre eux, donc difficilement généralisables, et que, de plus, la plus grande partie de la demande totale est générée par des clients dont la demande ne dépasse pas 50 conteneurs par an.

Deux conclusions majeures se dégagent de cette étude. Premièrement, il est possible d'identifier des modèles statistiques de prévision de la demande, même s'il est probable qu'il soit nécessaire d'en estimer plusieurs, afin de représenter adéquatement des couples (produit, zone) importants. Deuxièmement, un modèle pour la demande des clients à faible volume et pour la demande ''inattendue'', non prévue, devra aussi être calibré et associé à tous les autres couples (produit, zone). Nous espérons continuer ces recherches, à l'aide de donnée plus nombreuses correspondant aux opérations sur plusieurs années, afin de pouvoir mieux valider ces hypothèses.

Conclusion

Nous avons effectué un tour d'horizon de nos travaux et réalisations dans le domaine de la planification du transport terrestre de conteneurs. Nous avons proposé une approche hiérarchique combinant un modèle stratégique/tactique, qui détermine les dépôts à utiliser et les flux optimaux de conteneurs vides requis pour rééquilibrer le réseau sur une longue période, et un modèle opérationnel de répartition et de routage, basé sur une formulation d'optimisation de réseau dynamique et stochastique. Nous avons aussi brièvement évoqué les problèmes inhérents à de telles méthodes, soit la construction du réseau, l'estimation des coûts et l'évaluation de la demande et de ses variations.

Tout n'est pas encore résolu et des problèmes de recherche intéressants restent à étudier (estimation de la demande, intégration des problèmes de choix de mode et route aux modèles de répartition, etc.), mais nos travaux prouvent à la fois l'intérêt du problème de la planification du transport terrestre de conteneurs pour la théorie et la pratique de la recherche opérationnelle appliquée aux transport, et l'impact significatif que l'utilisation de méthodes et outils de recherche opérationnelle peut avoir sur les performances d'un système de transport.

Réferences

Box, G.E.P. et Jenkins, G.M. (1976), *Time Series Analysis, Forecasting and Control*, Holden-Day.

Crainic T.G., Dejax P.J. et Delorme L. (1989), *Models for Multimode Multicommodity Location Problems with Interdepot Balancing Requirements,* **Annals of Operations Research** 18, 279-302.

Crainic T.G., Delorme L. et Dejax P.J. (1989), *A Branch-and-Bound Approach for the Multicommodity Location Problem with Balancing Requirements,* Publication #652, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, soumis à **Naval Research Logistics**.

Crainic T.G. et Dejax P.J. (1989), *Freight Distribution and Transportation Systems Planning*, **International Journal of Physical Distribution & Materials Management** 19(1), 3-12.

Crainic T.G., Delorme L. et Dejax P.J. (1988), *Algorithms for Location/Distribution Problems with Balancing Requirements*, congrès conjoint **TIMS XXVIII/EURO IX**, Paris, 6-8 juillet.

Dejax P.J., Crainic T.G. et Delorme L. (1988), *Strategic/Tactic Planning of Container Land Transportation Systems*, congrès conjoint **TIMS XXVIII/EURO IX**, Paris, 6-8 juillet.

Dejax P.J. et Crainic T.G. (1987), *A Review of Empty Flows and Fleet Management Models in Freight Transportation*, **Transportation Science** 21(4), 227-247.

Dejax P., Crainic T.G., Delorme L., Bloise M., de Tocqueville E. et Hodgson J. (1987), *Planification tactique du transport terrestre des conteneurs vides - Rapport principal,* Rapport de recherche pour la **Compagnie Générale Maritime**.

Delorme L., Crainic T.G. et Dejax P.(1989), *Solving Multicommodity Location/Distribution Problems with Balancing Requirements*, **CORS/TIMS/ORSA Joint National Meeting**, Vancouver, 8-10 mai.

Delorme L., Crainic T.G. et Dejax P.J. (1988), *Dual Methods for Location/Distribution Problems with Balancing Requirements,* **ORSA/TIMS Joint National Meeting**, Washington, 26-27 avril.

Dixon, W.J. (1983), *BMDP Statistical Software Manual*, University of California Press; 1964, programme et manuel révisés en 1983.

Gendreau, M. (1988), *A Survey of Stochastic Models for Fleet Management*, congrès conjoint **TIMS XXVIII/EURO IX**, Paris, 6-8 juillet.

Guo, Z., Dejax, P.J., Crainic, T.G. et Delorme, L. (1989), *Résolution heuristique du problème de localisation-distribution avec équilibrage*, Actes du Colloque **Logistique: Production, Distribution, Transport**, AFCET, Paris, 13-15 décembre.

Hodgson Jr., J. (1989), *Application d'une méthode de "branch-and-bound" au problème de localisation avec transferts entre les dépôts*, Mémoire M.Sc., Publication #622, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

Powell, W.B. (1988), *A Comparative Review of Alternative Algorithms for the Dynamic Vehicle Allocation Problem* dans *Vehicle Routing: Methods and Studies*, B.L. Golden et A.A. Assad (éditeurs), Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland), 249-291.

Steffan, H. (1989), *Etude de la demande de conteneurs vides à court terme*, Rapport de stage fin d'études de l'Ecole Centrale Paris, publication # 651, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

Tétreault, Nicole (1989), *Une approche de restriction basée sur méthode primale-duale pour le problème de localisation - distribution avec échanges inter-dépôts*, Mémoire M.Sc., Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

Tétreault N., Delorme L. et Crainic T.G. (1989), *Primal-Dual Methods for Location Problems with Balancing Requirements*, **CORS/TIMS/ORSA Joint National Meeting**, Vancouver, 8-10 mai.

Vasseur, C. (1988), *Les coûts du transport ferroviaire par conteneurs en France: étude de cas*, Rapport de stage fin d'études de l'Ecole Centrale Paris, publication # 650, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.